干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2018.05.09

三个全球气候模式对中国气温季节变化模拟能力的空间差异特征分析①

卢晓菲[1]， 任传友[1]， 王艳华[1]， 崔凤茜[1]， 芦晓彤[1,2]， 宫诏健[1,3]

（1 沈阳农业大学农学院大气科学系，辽宁 沈阳 110866； 2 辽阳市气象局，辽宁 辽阳 111000；
3 营口经济技术开发区气象局，辽宁 营口 115007）

摘 要： 针对第五次国际耦合模式比较计划（CMIP5）中3个全球气候模式对中国气温季节变化模拟能力的空间差异特征进行具体分析。结果表明：BCC-CSM1.1（m）模式和GFDL-CM3模式能够再现中国气温的季节性变化，在中国东部地区模拟能力较强，平均绝对误差和均方根误差均较小，在中国西部地区模拟能力较弱，平均绝对误差和均方根误差较大。与BCC-CSM1.1（m）和GFDL-CM3模式相比，HADGEM2-ES模式再现中国地区气温季节变化的能力最弱，平均绝对误差和均方根误差在西部部分地区、内蒙古地区和东北地区较大，在华南地区南部较小。在相同模式下，日平均气温模拟效果最好，其次是日最低气温，日最高气温模拟效果最差。纬度、经度、海拔和坡度对气候模式模拟效果的影响存在模式间的差异，而坡向和地形遮蔽度对模式的模拟效果无明显影响。

关 键 词： 全球气候模式；气温；空间差异

中图分类号： P467　　**文献标识码：** A　　**文章编号：**

气候系统模式是研究气候变化机理以及预测未来气候变化的重要工具[1]。第五次国际耦合模式比较计划（Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5，CMIP5）共包含23个模式组的46个地球系统模式和15个中等复杂程度的地球系统模式。其试验数据资料被广泛应用于气候变化机理以及对未来气候变化特征预估等方面的研究[2－3]，同时也是政府间气候变化专门委员会（IPCC）评估报告中引用的重要内容之一。"气候模式的可靠性如何"？是一个基本的科学问题[4]，与以往的评估报告相比，CMIP5模式具有许多明显的改进，一方面对整个气候系统进行了更客观的科学分析，另一方面，在气候模式方面，考虑了更多影响因子，加入了碳循环和动态植被等过程[5－6]。但由于气候系统的极端复杂性，全球气候模式对气候系统中一些重要反馈机制尚不清楚，可能在模拟气候时存在一定的误差和局限性，因此有必要针对气候模式的模拟能力进行评估[7－9]。

针对CMIP5全球气候模式对气温模拟能力的评估，国外学者进行了一些研究。NOEL R A等评估了25个CMIP5模式对中非地区气候的模拟能力，发现气候模式对中非地区的年平均气温的模拟较好，但存在空间异质性[10]。PATTNAYAK K C等针对孟加拉湾毗邻的七个国家的气温模式模拟结果进行评估，结果表明模型集合平均能够表现七个国家气温的空间分布[11]。CARY L等利用CMIP5的气候模式对美国东北部气温的季节变化模拟中发现，气候模式对冬季和夏季的气温模拟偏高[12]。CATTIAUX J等评估了CMIP5模型模拟的欧洲气温及预估RCP8.5情景下气温的变化趋势，发现未来欧洲夏季升温的速度将高于冬季[13]。

我国学者利用CMIP5试验结果开展了很多气候模拟的相关研究，取得了一定的成果。姜燕敏等从气候态和年际变率两方面评估了CMIP5的20个

① 收稿日期：2018－04－22； 修订日期：2018－06－18
基金项目：国家重点研发计划项目课题（2016YFD0300103）；中国气象局沈阳大气环境研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目（2016SYIAEZD1）
作者简介：卢晓菲（1992－），女，辽宁省沈阳市，硕士研究生，研究方向为应用气候. E-mail：501305863@qq.com
通讯作者：任传友，男，博士，副教授. E-mail：renchuanyou0421@sina.com.cn；
王艳华，女，博士，讲师. E-mail：yanhuawang999@sina.com.cn

气候模式对中亚地区年平均气温的模拟性能[14];XU 等利用 18 个 CMIP5 气候模式模拟了中国气温和降水的变化[15];崔研等评估了 5 个全球气候模式对中国东北地区地面温度的模拟,发现全球气候模式能够较高的再现中国东北地面温度的年变化和空间分布特征[16];胡芩等评估了全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力[17];孙侦等人评估了全球气候模式对 1996—2005 年中国气温模拟能力,发现气候模式模拟的中国东南部地区精度较高,西部地区模拟效果较差[7];姚遥等利用 8 个 CMIP5 模式分析了中国极端气温的模拟和预估[18];张艳武等利用 29 个气候模式分析了中国地区年平均气温的模拟和预估[19];郭彦等利用 CMIP3 模式和 CMIP5 模式对中国年平均气温模拟进行比较[20];YANG 等利用气候模式分析了过去及未来 3 个 RCP 情景下的中国极端气候变化,发现大多数模型都能够模拟极端指数的主要特征,不过由于物理过程参数化的复杂性等原因,在极端气候模拟方面仍然存在很大的不确定性[21]。

针对 CMIP5 模式气温模拟能力评估及预估未来气温变化已经有很多相关研究,但对于气候模式气温季节变化模拟能力与一些影响因子之间关系的相关研究还未见报道。研究表明得出影响气温分布与变化的因素主要包括:宏观地理条件、海拔高度、地形(坡度、坡向、地形遮蔽度等)、下垫面性质等,其中尤以海拔高度和地形的影响最为显著[22-23]。气候模式模拟气温的误差除了与模式本身物理过程的描述是否符合实际、模型的分辨率有关外,还与陆—气、海—气相互作用考虑是否充分有关,因此下垫面状况,特别是地形因素可能是影响模型模拟能力的因素之一。地形因素是否是影响模式模拟能力的因子?其影响的程度有多大?该方面的研究仍相当缺乏。BCC-CSM1.1(m)模式是中国气象局北京气候中心研发的可用于短期气候预测和气候变化研究的海—陆—气—冰—生多圈层耦合模式,该模式系统已在中国短期气候预测业务中和气候变化研究中发挥了重要作用。在其它众多的模式中,美国国家海洋大气局地球物理流体动力学实验室(NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)的 GFDL-CM3、英国气象局哈德利中心(Met Office Hadley Centre)的 HADGEM2-ES 在全球气候变化模拟中得到了广泛的应用。很多学者也对 BCC-CSM1.1(m)、GFDL-CM3 和 HADGEM2-ES 模式模拟的中国地区的气候变化进行了验证和预估,表明上述三个模式模拟的效果较好[7,14,24]。因此本文选取第五次国际耦合模式比较计划(CMIP5)中 BCC-CSM1.1(m)、GFDL-CM3 和 HADGEM2-ES 模式,利用中国 663 个常规气象台站 1951—2004 年经过质量控制和均一性检验与订正处理的逐日平均、最高和最低气温数据验证了 3 个模式的模拟能力,探讨了模式模拟能力随经度、纬度、海拔高度、坡度、坡向和地形遮蔽度的变化规律,研究结果可为气候模式区域资料的订正提供参考。

1 资料与方法

1.1 数据资料

本研究利用中国气象数据网站提供的中国近 50 a 均一化历史气温数据集得到中国地面基本、基准站 1951—2004 年经过质量控制和均一性检验与订正处理的日平均气温、日最高气温和日最低气温数据作为观测数据[25],利用 IPCC 数据中心(http://www.ipcc.data.org/index.html)提供的 BCC-CSM1.1(m)模式、GFDL-CM3 模式和 HADGEM2-ES 模式同期(1951—2004 年)历史气候模拟实验结果中的逐日气温数据作为基本数据,用观测数据验证和评价 3 个全球气候模式模拟能力。利用 500 m × 500 m 数字高程模型(DEM)数据,获取海拔、坡度、坡向和地形遮蔽度等地理信息数据,探寻气候模式模拟能力与纬度、经度、海拔、坡度、坡向和地形遮蔽度之间的关系。3 个全球气候系统模式的信息如表 1 所示。

1.2 研究方法

将经过质量控制和均一性检验与订正处理的气温数据进行严格筛选,选出各个站点气温数据大于 30 a 的作为观测数据,共计选出 663 个观测站点,计算每个站点的多年逐日日平均气温、日最高气温和日最低气温序列。将获取的CMIP5的3个全球气

表 1 CMIP5 全球气候模式的基本信息

Tab.1 General information of CMIP5 global climate models

模式名称	研究机构	分辨率
BCC-CSM1.1(m)	中国气象局北京气候中心	1.1°×1.1°
GFDL-CM3	美国国家海洋大气局地球物理流体动力学实验室	2.5°×2°
HADGEM2-ES	英国气象局哈德利中心	1.875°×1.25°

候模式的历史气候模拟实验结果格点数据进行处理转换成站点数据，本文采用的是反距离权重插值方法，以此提取各个观测站点相应位置模式模拟的日平均气温、日最高气温和日最低气温数据，计算其多年逐日平均气温序列，利用观测数据验证和评价3个全球气候模式的模拟能力。从DEM数据中提取经度、纬度、海拔高度、坡度、坡向及地形遮蔽度栅格数据，同样利用反距离权重插值方法提取各个观测站点相应位置的地形参数数据，以此探寻模拟能力与纬度、经度、海拔、坡度、坡向和地形遮蔽度之间的相关关系及规律。

1.2.1 反距离权重插值 假设站点的位置为(x, y)，模式模拟的要素值为T_{model}，站点周围最邻近的4个格点及要素值分别为(x_j, y_j)和T_j，$j=1,2,3,4$，则T_{model}可表示为[26]：

$$T_{model} = \sum_{j=1}^{4}\frac{T_j}{d_j^2} \Bigg/ \sum_{j=1}^{4}\frac{1}{d_j^2} \tag{1}$$

式中：d_j为距离，可表示为：

$$d_j = \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \tag{2}$$

1.2.2 评估参数 本文采用3种评估参数，时间相关系数(r)、平均绝对误差(MAE/℃)和均方根误差($RMSE$/℃)来表征全球气候模式对中国气温季节变化的模拟能力。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(T_{obs,i} - \overline{T_{obs}})(T_{model,i} - \overline{T_{model}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(T_{obs,i} - \overline{T_{obs}})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}(T_{model,i} - \overline{T_{model}})^2}} \tag{3}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n}\left|T_{obs,i} - T_{model,i}\right| \tag{4}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(T_{obs,i} - T_{model,i})^2 / n} \tag{5}$$

式中：$T_{obs,i}$和T_{model}，分别为站点第i天的观测值和模式模拟值，$\overline{T_{obs}}$和$\overline{T_{model}}$分别为站点观测值和模式模拟值的时间平均值。

2 结果与讨论

2.1 全球气候模式模拟中国气温季节变化能力的评估

全球气候模式模拟中国地区气温与站点观测值的相关系数的空间分布如图1所示。表2是CMIP5全球气候模式对中国气温模拟能力的评估结果。结合图1和表2可以看出，BCC-CSM1.1(m)与GFDL-CM3模式模拟中国地区日平均气温(图1a、1b)、日最高气温(图1d、1e)、日最低气温(图1g、1h)与站点观测值的相关系数均通过了$p<0.01$显著性检验。其中BCC-CSM1.1(m)模式模拟的日平均、最高、最低气温与观测的日平均、最高、最低气温的相关系数大于0.96的站点占全部站点比率为94.6%~96.4%；GFDL-CM3模式模拟值与观测值的相关系数大于0.96的站点占全部站点比率为91.9%~96.4%，其中日平均气温和日最高气温模拟值与观测值的相关系数在广西地区相对其它地区较小，但仍达到极显著水平，说明模式模拟值与观测值趋势一致性很高，气候模式能够再现气温的季节变化；与BCC-CSM1.1(m)和GFDL-CM3模式相比，HADGEM2-ES模式的模拟值与观测值的相关系数虽然皆通过了$p<0.01$显著性检验，但其相关系数大于0.96的站点占全部站点比率仅为0.3%~0.9%，但

表2 CMIP5全球气候模式对中国气温模拟能力的评估结果

Tab.2 Evaluation results of air temperature simulated by CMIP5 global climate models in China

模式名称	温度	满足条件的站点占全部站点的百分率/%					
		$r>0.96$	$r<0.84$	$MAE<3$	$MAE>6$	$RMSE<3$	$RMSE>6$
BCC-CSM1.1(m)	TAVE	96.4	0.6	70.4	10.1	66.3	11.6
	TMAX	94.6	0.7	52.3	15.6	43.1	17.1
	TMIN	96.1	0.4	66.3	11.4	58.8	13.1
GFDL-CM3	TAVE	96.4	0.1	59.5	13.5	52.5	14.3
	TMAX	91.9	0.1	23.1	26.5	15.8	29.0
	TMIN	96.4	0.1	57.9	13.8	49.9	15.6
HADGEM2-ES	TAVE	0.3	10.7	12.9	32.0	8.0	47.4
	TMAX	0.4	11.3	7.5	35.6	5.3	52.8
	TMIN	0.9	12.2	11.6	33.7	6.2	49.2

相关系数介于0.84～0.96的站点占全部站点比率为86.9%～89.0%,其中模拟日平均气温(图1c)和日最低气温(图1i)的相关系数在西北地区西部与青海四川交界处相对较小,模拟日最高气温(图1f)的相关系数在西北地区西部和四川及云南地区相对较小。可见,BCC-CSM1.1(m)与GFDL-CM3模式模拟值与气象站点观测值趋势一致,能够较好地再现中国地区气温的季节性变化,而HADGEM2-ES模式虽然也能再现中国地区气温的季节性变化,但与BCC-CSM1.1(m)和GFDL-CM3模式相比,其模拟中国气温季节变化的能力是最弱的。

2.2 全球气候模式模拟中国气温的空间分布

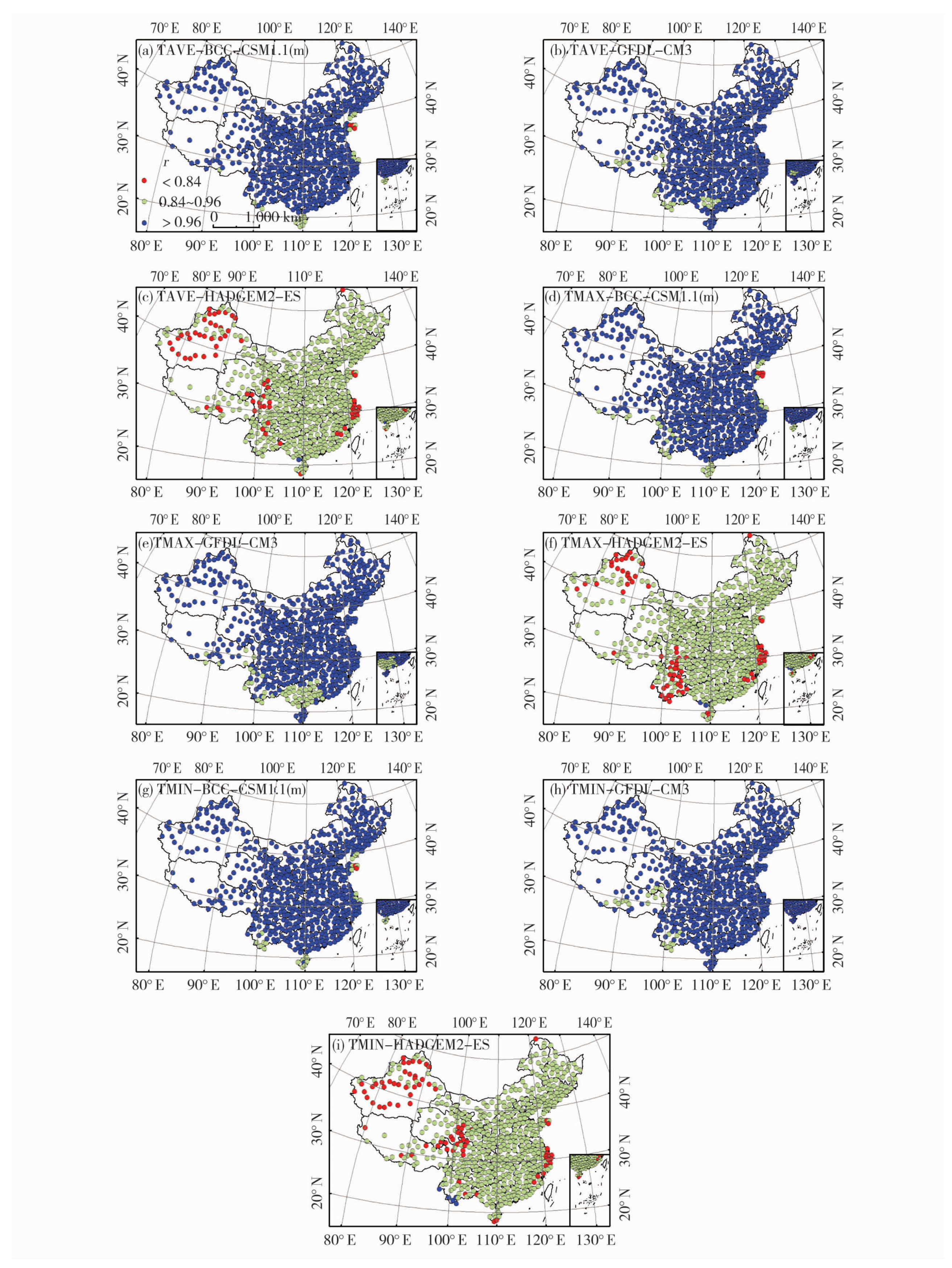
从表2中可以看出,BCC-CSM1.1(m)模式模拟的日平均气温、日最高气温和日最低气温的均方根误差和平均绝对误差小于3 ℃的站点占全部站点的比例最高,GFDL-CM3模式次之,HADGEM2-ES模式最小。BCC-CSM1.1(m)模式评估的误差显著地小于GFDL-CM3和HADGEM2-ES模式,而GFDL-CM3模式又显著地小于和HADGEM2-ES模式($p<0.05$)。而在相同模式情况下,气温的均方根误差和平均绝对误差小于3 ℃的点数比例从高到低依次为日平均气温、日最低气温和日最高气温,同样的均方根误差和平均绝对误差大于6 ℃的点数比例最少的依次为日平均气温、日最低气温和日最高气温。可见,3个气候模式对日平均气温的模拟能力最强,其次为日最低气温,日最高气温。而3个气候模式相对比,对中国气温模拟能力最强的是BCC-CSM1.1(m)模式,其次为GFDL-CM3模式和HADGEM2-ES模式。

图2和图3分别为全球气候模式模拟中国气温与站点观测值的平均绝对误差和均方根误差的空间分布图。可以看出,平均绝对误差和均方根误差的空间分布大致相同,日最低气温和日平均气温的空间分布也大致相同。BCC-CSM1.1(m)模式模拟的日平均气温(图2a、图3a)和日最低气温(图2g、图3g)平均绝对误差和均方根误差小于3 ℃的站点主要分布在东北、华北、中南和华东地区,模拟误差由东向西逐渐变大,在中国西部地区的模拟误差较大,气候模式模拟的日最高气温(图2d、图3d)与日平均气温和日最低气温相比,华北和东北地区的模拟误差变大。GFDL-CM3模式模拟的日平均气温(图2b、图3b)和日最低气温(图2h、图3h)的平均绝对误差和均方根误差的空间分布与BCC-CSM1.1(m)模式大致相同,模拟误差由东向西逐渐变大,在内蒙古、东北、江南、华南和西南南部地区模拟误差较小,模式模拟的日最高气温(图2e、图3e)在江南西部、华南地区及贵州省模拟误差较大,其中模拟日最低气温与日平均气温相比,华南北部地区的模拟误差变大。HADGEM2-ES模式由南向北气温的平均绝对误差和均方根误差逐渐变大,在华南地区南部模拟误差最小,除了在西部地区误差较大外,在内蒙古地区和东北地区误差也较大。3个气候模式在中国西部地区模拟误差均较大,平均绝对误差和均方根误差多数大于3 ℃。XU等[15]研究结果也表明,大多数模式对中国西部地区气温的模拟误差较大,这一方面可能与西部地区复杂的下垫面物理特性有关,例如对青藏高原大地形的处理不当[27],也可能因为是气候变化的敏感区而产生误差,另一方面可能是观测资料本身存在误差,例如青藏高原地区大部分观测站点位于海拔较低的河谷地区,观测气温的代表性较差由此造成误差[19]。

2.3 全球气候模式的模拟能力与各影响因子之间的关系

陆—气、海—气相互作用考虑是否充分是影响气候模式模拟能力的重要原因之一。由于海—气相互作用的热力调整时间随纬度升高而增加,导致海洋—大气的耦合程度降低,根据中国的地理位置特点,经度的不同反映了距海远近的差异,因此,气候模式模拟能力在不同的纬度和经度上可能会表现出一定的差异。另外,下垫面状况,特别是地形因素也是影响模式模拟能力的因素之一。为了分析全球气候模式的模拟能力和各影响因子之间的相关关系,本研究将纬度、经度、海拔、坡度、坡向和地形遮蔽度作为全球气候模式模拟能力的影响因子,由于气候模式模拟中国气温与站点观测值的平均绝对误差和均方根误差的评估结果大致相同,本文选取3个模式的平均绝对误差作为模拟能力评价指标,对3个全球气候模式模拟的日平均气温的绝对平均误差和纬度、经度、海拔、坡度、坡向和地形遮蔽度之间的相关关系及其相关规律进行分析。

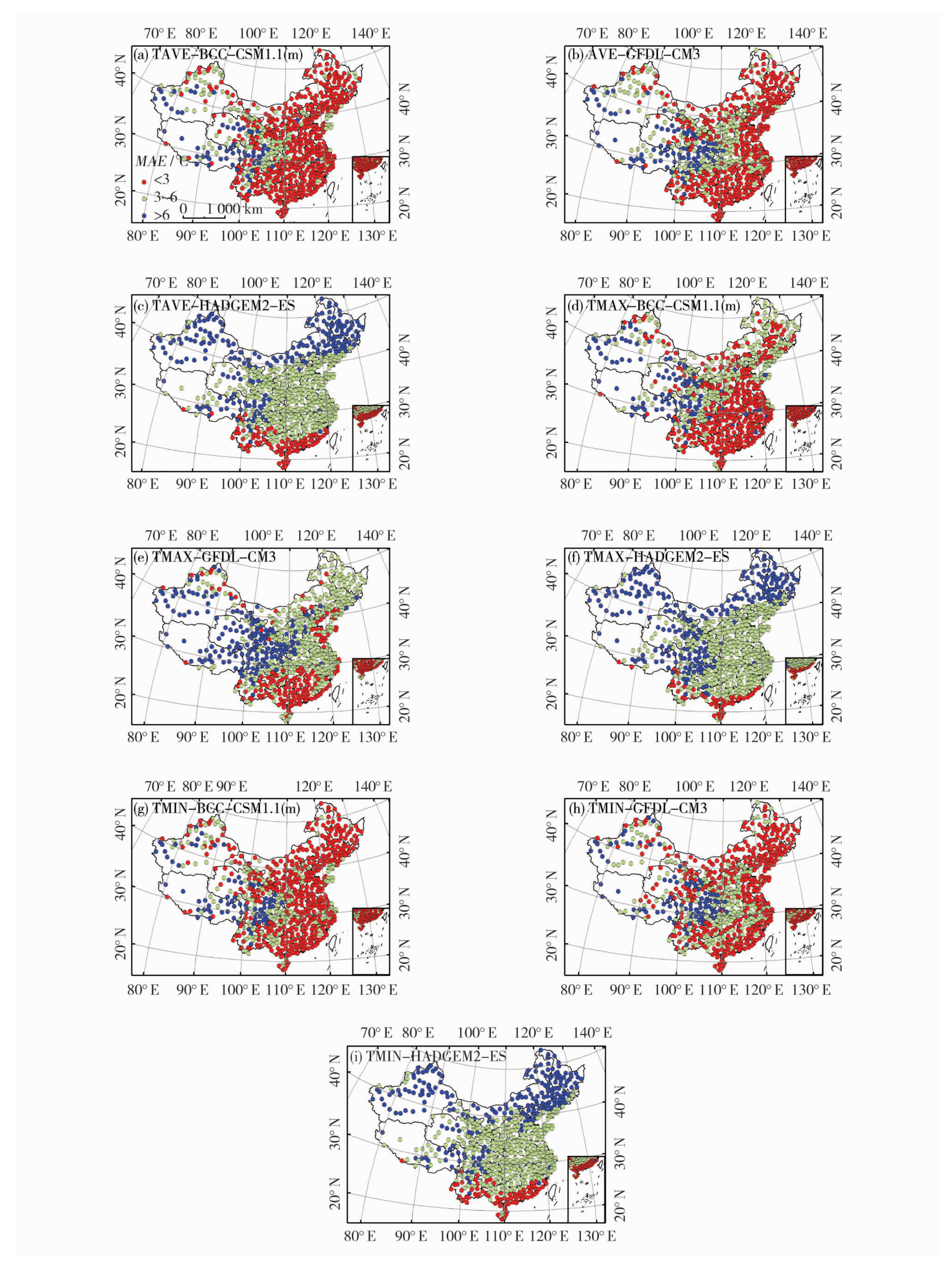
从图4～6可看出,BCC-CSM1.1(m)模式和GFDL-CM3模式模拟日平均气温的平均绝对误差在低纬地区和高纬地区的较小,离散程度也较小,在中纬地区误差和离散程度较大,在31 °N和37 °N附近达到两个极大值。与低纬度和高纬度地区的模拟能力相比,BCC-CSM1.1(m)模式和GFDL-CM3模



底图来自国家测绘地理信息局 1∶2 200 万中国地图 审图号:GS(2016)2884 号

图 1 全球气候模式模拟中国气温与站点观测值的相关系数

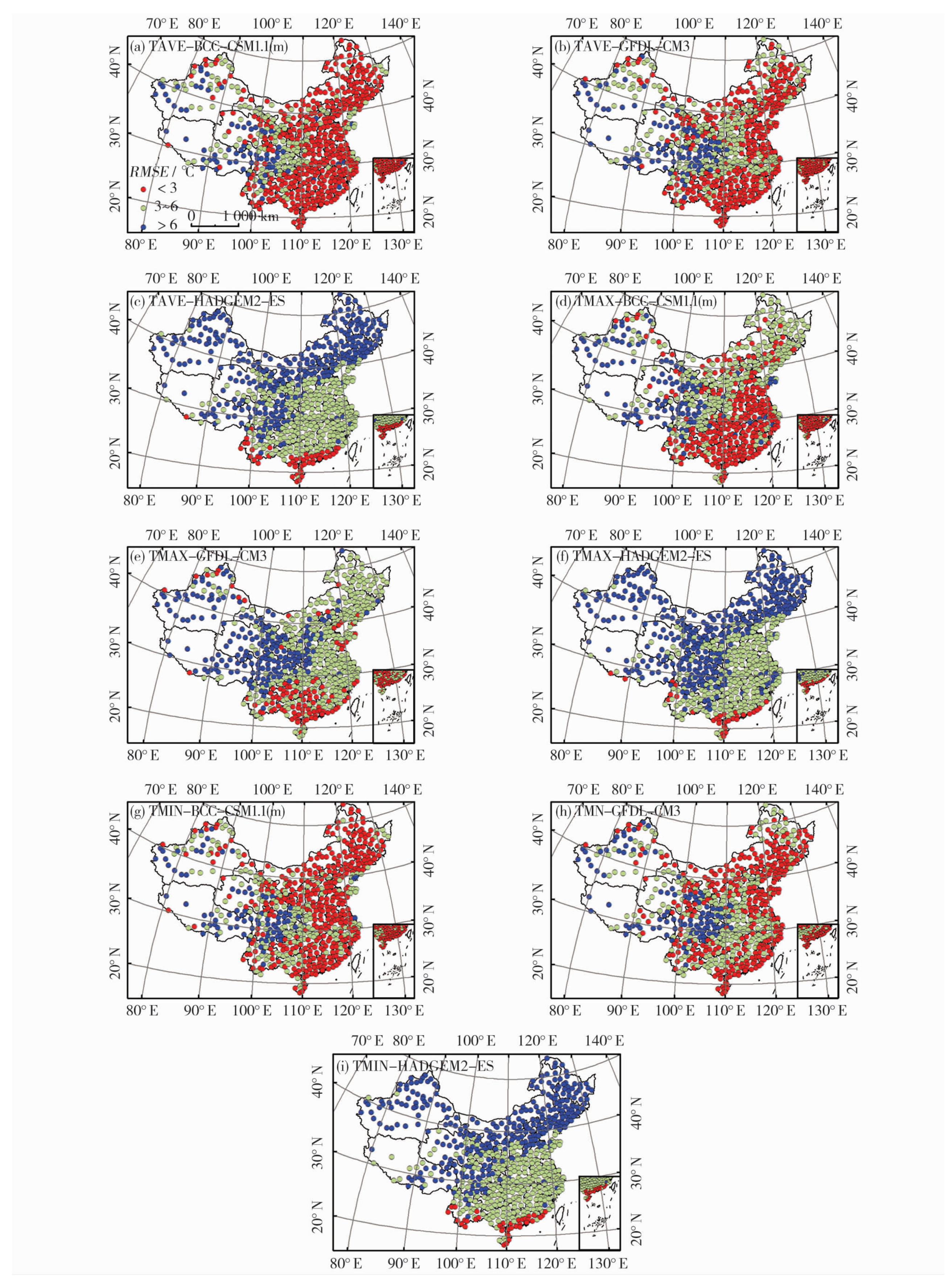
Fig. 1 Correlation coefficient between air temperature observed at sites and simulated by global climate models



底图来自国家测绘地理信息局 1∶2 200 万中国地图 审图号:GS(2016)2884 号

图 2 全球气候模式模拟中国气温的平均绝对误差的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution ofmean absolute error of air temperature in China simulated by global climate models



底图来自国家测绘地理信息局 1:2 200 万中国地图 审图号:GS(2016)2884 号

图 3 全球气候模式模拟中国气温的均方根误差的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution ofroot mean square error of air temperature in China simulated by global climate models

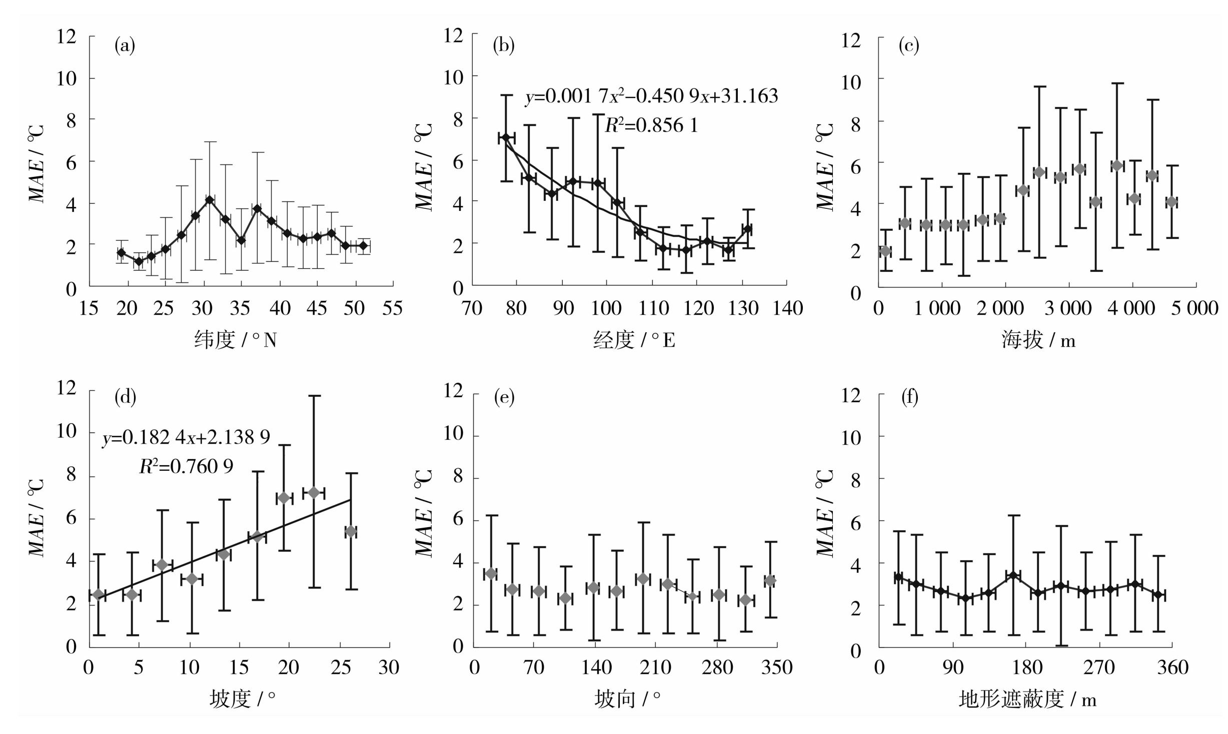


图 4　BCC-CSM1.1(m)模式模拟日平均气温的平均绝对误差(*MAE*)随(a)纬度、(b)经度、(c)海拔、(d)坡度、(e)坡向和(f)地形遮蔽度的变化规律

Fig. 4　Changing rules of the mean absolute error (*MAE*) of daily mean air temperature simulated by BCC-CSM1.1(m) model vary with (a) latitude, (b) longitude, (c) altitude, (d) slope, (e) aspect and, (f) terrain obscuration

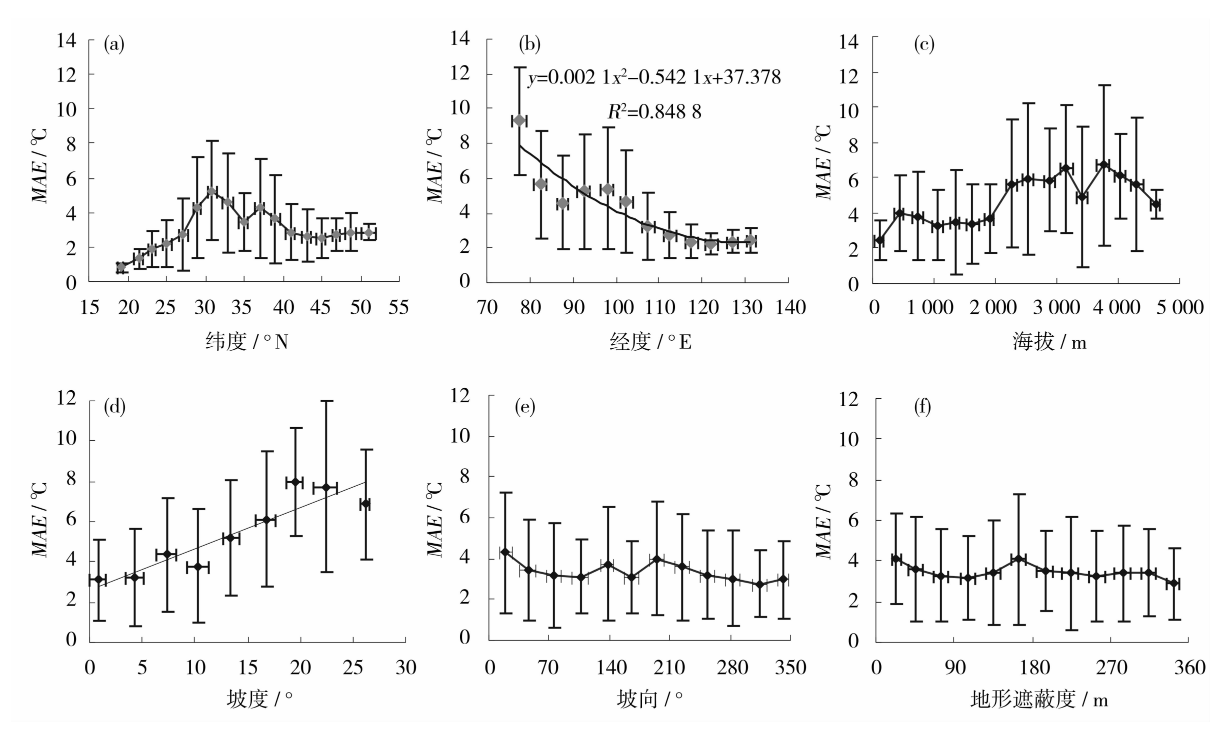


图 5　GFDL-CM3 模式模拟日平均气温的平均绝对误差(*MAE*)随(a)纬度、(b)经度、(c)海拔、(d)坡度、(e)坡向和(f)地形遮蔽度的变化规律

Fig. 5　Changing rules of the mean absolute error (*MAE*) of daily mean air temperature simulated by GFDL-CM3 model vary with (a) latitude, (b) longitude, (c) altitude, (d) slope, (e) aspect and, (f) terrain obscuration

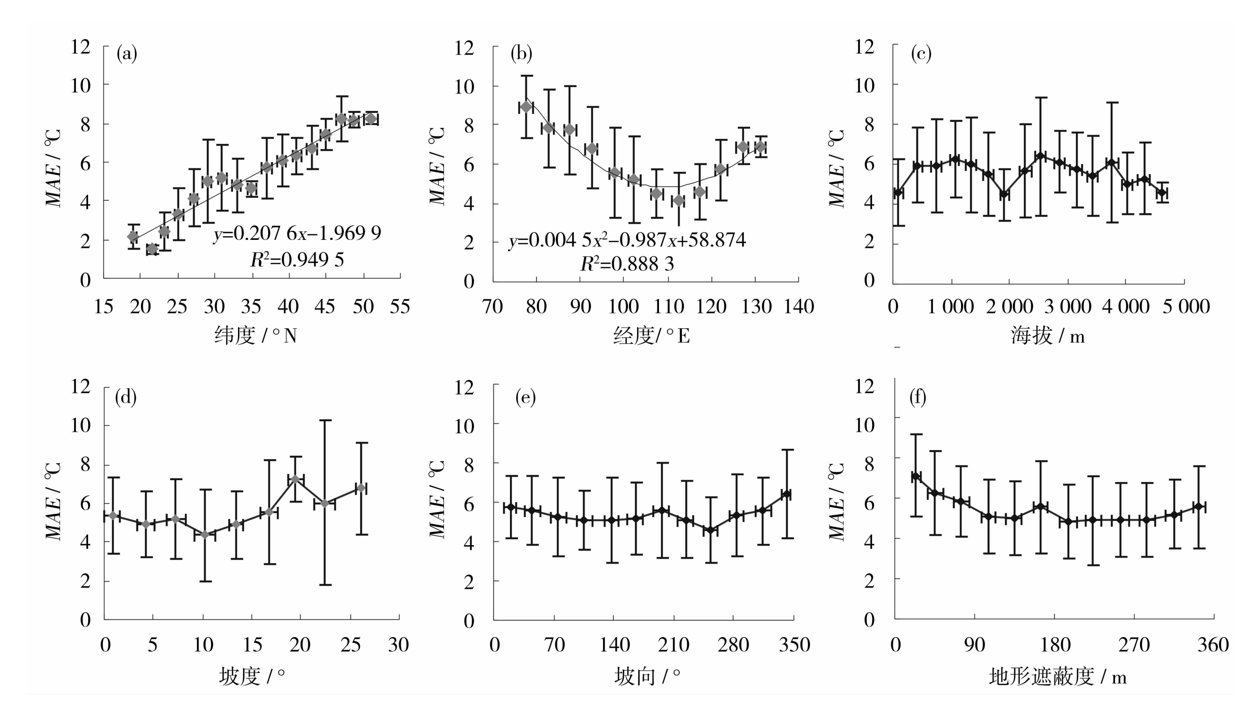


图 6　HADGEM2-ES 模式模拟日平均气温的平均绝对误差(*MAE*)随(a)纬度、(b)经度、(c)海拔、(d)坡度、(e)坡向和(f)地形遮蔽度的变化规律

Fig. 6　Changing rules of the mean absolute error (*MAE*) of daily mean air temperature simulated by HADGEM2 – ES model vary with (a) latitude, (b) longitude, (c) altitude, (d) slope, (e) aspect and, (f) terrain obscuration

式在中纬度地区的模拟能力相对较弱,这可能与中纬度地区的气温年较差大,而且高、低纬度的盛行气团在这一带相互交迭,气旋活动频繁,天气变化较为剧烈有关,而 HADGEM2-ES 模式则在低纬地区误差较小,随着纬度的增大,模拟能力越弱。BCC-CSM1.1(m)模式和 GFDL-CM3 模式模拟日平均气温的平均绝对误差和离散程度随经度的增加呈减小趋势,与两个气候模式模拟能力自西向东误差呈减小趋势的空间分布(图 2a、2b)相一致,HADGEM2-ES 模式模拟的平均绝对误差随经度的增加首先呈减小趋势,在 112 °E 附近达到最小值,然后随经度增加呈增大的趋势。当海拔超过 2 000 m 时,BCC-CSM1.1(m)模式和 GFDL-CM3 模式模拟日平均气温的平均绝对误差明显变大,与海拔小于 2 000 m 的模拟误差相比分别增长了 52.3% 和 47.6%,可见海拔同样影响了气候模式的模拟能力,在中国平均海拔在 2 000 m 以上的省份只有青海省和西藏自治区,造成误差较大的原因一方面可能是因为地形的复杂且多变,并且当地气候也随地区的不同而变化很大,气候模式对于这种复杂地形和气候的模拟较为欠缺,另一方面可能由于气象站点分布不均导致观测数据的代表性较差。BCC-CSM1.1(m)模式和 GFDL-CM3 模式模拟日平均气温的平均绝对误差与坡度呈线性正相关关系,坡度越大,平均绝对误差越大,坡度每增加 1°平均绝对误差分别增长 2.3 ℃和 2.8 ℃,说明两个气候模式在坡度大的地区模拟能力较弱,这可能是由于气候模式的分辨率不足导致对地形描述不准确而引起的模拟误差较大造成的[28-29],而 HADGEM2-ES 模式模拟的日平均气温的平均绝对误差随坡度没有明显的变化趋势。3 个气候模式的平均绝对误差随坡向和地形遮蔽度的变化没有明显规律。

3　结 论

本文利用经过质量控制和均一性检验与订正处理的历史逐日气温数据,针对 3 个 CMIP5 全球气候模式对中国地区日平均气温、日最高气温和日最低气温的模拟能力进行评估,以及探寻模拟能力与各影响因子之间的关系。结果表明:

(1) BCC-CSM1.1(m)与 GFDL-CM3 模式模拟值与气象站点观测值趋势一致,能够将中国地区气温季节性变化进行再现,与之相比,HADGEM2-ES 模式模拟中国气温季节变化能力较弱。

(2) 3 个气候模式模拟中国气温与站点观测值

的平均绝对误差和均方根误差的空间分布大致相同,BCC-CSM1.1(m)模式模拟的日平均气温和日最低气温平均绝对误差和均方根误差在东北、华北、中南和华东地区较小,在西部地区较大,模式模拟的日最高气温与日平均气温和日最低气温相比,华北和东北地区的模拟误差变大。GFDL-CM3 模式模拟的日平均气温和日最低气温的空间分布与 BCC-CSM1.1(m)模式相似,模拟误差由东向西逐渐变大。HADGEM2-ES 模式由南向北气温的平均绝对误差和均方根误差逐渐变大,在华南地区南部模拟误差最小,除了在西部地区误差较大外,在内蒙古地区和东北地区误差也较大。

(3) 3 个气候模式对气温模拟能力最强的为日平均气温,其次为日最低气温,日最高气温。而 3 个气候模式相对比,对中国气温模拟能力最强的是 BCC-CSM1.1(m)模式,其次为 GFDL-CM3 模式和 HADGEM2-ES 模式。

(4) 通过对 3 个全球气候模式模拟的日平均气温的平均绝对误差和纬度、经度、海拔、坡度、坡向和地形遮蔽度之间的相关关系进行分析表明,BCC-CSM1.1(m)模式和 GFDL-CM3 模式在低纬度和高纬度地区、经度大、坡度小且海拔小于 2 000 m 以下的地区模拟能力较强,而 HADGEM2-ES 模式则在低纬地区以及经度在 112 °E 附近的地区模拟能力最强。3 个气候模式的平均绝对误差随坡向和地形遮蔽度的变化没有明显规律。

(5) 总的来看,综合考虑模式模拟的相关系数、平均绝对误差和均方根误差,BCC-CSM1.1(m)模式和 GFDL-CM3 模式对中国地区温度模拟能力最强,BCC-CSM1.1(m)模式模拟效果要优于 GFDL-CM3 模式,其中对日平均气温的模拟能力要强于日最低气温,日最高气温的模拟能力最弱,HADGEM2-ES 模式模拟中国地区气温能力较弱。因此,在研究中国地区气候变化相关课题时,选择 BCC-CSM1.1(m)模式和 GFDL-CM3 模式的模拟结果更加科学合理。

参考文献(References)

[1] IPCC. Climate change 2007:The physical science basis[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2007.

[2] 辛晓歌,吴统文,张洁. BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验介绍[J]. 气候变化研究进展,2012,8(5):378 – 382. [XIN Xiaoge, WU Tongwen, ZHANG Jie. Introduction of CMIP5 experiments carried out by BCC climate system model[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis,2012,8(5):378 – 382.]

[3] 张雪芹,彭莉莉,林朝晖. 未来不同排放情景下气候变化预估研究进展[J]. 地球科学进展,2008,23(2):174 – 185. [ZHANG Xueqin, PENG Lili, LIN Chaohui. Research progress of climate change prediction in future emission scenarios[J]. Advances in Earth Science,2008,23(2):174 – 185.]

[4] 王澄海,吴永萍,崔洋. CMIP 研究计划的进展及其在中国地区的检验和应用前景[J]. 地球科学进展,2009,24(5):461 – 468. [WANG Chenghai, WU Yongping, CUI Yang. Progress of CMIP research programs and its inspection and application prospects in China region[J]. Advances in Earth Science,2009,24(5):461 – 468.]

[5] 胡国权,赵宗慈. IPCC 第五次评估报告中所用的气候模式有进步吗? [J]. 气候变化研究进展,2014,10(1):45 – 50. [HU Guoquan, ZHAO Zongci. Are climate models of IPCC AR5 getting better than before? [J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis,2014,10(1):45 – 50.]

[6] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1068 – 1076. [SHEN Yongping, WANG Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(5):1068 – 1076.]

[7] 孙侦,贾绍凤,吕爱锋,等. IPCC AR5 全球气候模式对 1996—2005 年中国气温模拟精度评价[J]. 地理科学进展,2015,34(10):1229 – 1240. [SUN Zhen, JIA Shaofeng, LV Aifeng, et al. Assesment on precision of temperature simulated by the IPCC AR5 GCMs in China,1996—2005[J]. Progress in Geography,2015,34(10):1229 – 1240.]

[8] MASSON D, KNUTTI R. Spatial-scale dependence of climate model performance in the CMIP3 ensemble [J]. Journal of Climate, 2006,19:5843 – 5858.

[9] 谢永坤,刘玉芝,黄建平,等. 雪冰反馈对北半球经向温度梯度的影响[J]. 地球科学进展,2013,28(11):1276 – 1282. [XIE Yongkun, LIU Yuzhi, HUANG Jianping, et al. Impact of the ice-albedo feedback on meridional temperature gradient of northern hemisphere[J]. Advance in Earth Science,2013,28(11):1276 – 1282.]

[10] NOEL R A, JUSTIN S, JAMESE S, et al. Evaluation of historical and future simulations of precipitation and temperature in Central Africa from CMIP5 climate models[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2016,121(1):130 – 152.

[11] PATTNAYAK K C, KAR S C, DALAL M, et al. Projections of annual rainfall and surface temperature from CMIP5 models over the BIMSTEC countries[J]. Global and Planetary Change,2017,152(17):152 – 166.

[12] LYNCH C, SETH A, THIBEAULT J. Recent and projected annual cycles of temperature and precipitation in the Northeast United States from CMIP5[J]. Journal of Climate,2015,29(1):347 – 365.

[13] CATTIAUX J, DOUVILLE H, PEINGS Y. European temperatures

in CMIP5: Origins of present-day biases and future uncertainties [J]. Climate Dynamics, 2013, 41(11): 2889 – 2907.

[14] 姜燕敏,吴昊旻. 20 个 CMIP5 模式对中亚地区年平均气温模拟能力评估[J]. 气候变化研究进展,2013,9(2):110 – 116. [JIANG Yanmin, WU Haomin. Evaluation of annual mean temperature simulation capability of 20 CMIP5 modes in Central Asia [J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2013, 9(2): 110 – 116.]

[15] XU Y, XU C. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5: 489 – 494.

[16] 崔研,李倩,周晓宇,等. 5 个全球气候模式对中国东北地区地面温度的模拟与预估[J]. 气象与环境学报,2013,29(4):37 – 46. [CUI Yan, LI Qian, ZHOU Xiaoyu, et al. Simulation and projection of the surface temperature based on five global climate models over the northeast China[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(4): 37 – 46.]

[17] 胡芩,姜大膀,范广洲. CMIP5 全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估[J]. 大气科学,2014,38(5):924 – 938. [HU Qin, JIANG Dabang, FAN Guangzhou. Evaluation of CMIP5 models over the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Sciences, 2014, 38(5): 924 – 938.]

[18] 姚遥,罗勇,黄建斌. 8 个 CMIP5 模式对中国极端气温的模拟和预估[J]. 气候变化研究进展,2012,8(4):250 – 256. [YAO Yao, LUO Yong, HUANG Jianbin. Simulation and prediction of extreme temperature in China by 8 CMIP5 modes[J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 2012, 8(4): 250 – 256.]

[19] 张艳武,张莉,徐影. CMIP5 模式对中国地区气温模拟能力评估与预估[J]. 气候变化研究进展,2016,12(1):10 – 19. [ZHANG Yanwu, ZHANG Li, XU Ying. Evaluation and estimation of simulation capability of China's regional temperature by CMIP5 model[J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 2016, 12(1): 10 – 19.]

[20] 郭彦,董文杰,任福民,等. CMIP5 模式对中国年平均气温模拟及其与 CMIP3 模式的比较[J]. 气候变化研究进展,2013,9(3):181 – 186. [GUO Yan, DONG Wenjie, REN Fumin, et al. Comparison of CMIP5 model for annual mean temperature simulation in China and its comparison with CMIP3 model[J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 2013, 9(3): 181 – 186.]

[21] YANG S L, FENG J M, DONG W J, et al. Analyses of extreme climate events over China based on CMIP5 historical and future simulations[J]. Advance in Atmospheric Sciences, 2014, 31(5): 1209 – 1220.

[22] 翁笃鸣,罗哲贤. 山区地形气候[M]. 北京:气象出版社,1990. [WENG Duming, LUO Zhexian. Mountain terrain climate [M]. Beijing: Meteorological Press, 1990.]

[23] 袁淑杰,谷晓平,缪启龙,等. 基于 DEM 的复杂地形下平均气温分布式模拟研究[J]. 自然资源学报,2010,25(5):859 – 867. [YUAN Shujie, GU Xiaoping, MIU Qilong, et al. Study on distributed simulation of mean temperature over complex terrains based on DEM[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(5): 859 – 867.]

[24] 陶纯苇,姜超,孙建新. CMIP5 模式对中国东北气候模拟能力的评估[J]. 气候与环境研究,2016,21 (3):357 – 366. [TAO Chunwei, JIANG Chao, SUN Jianxin. Evaluation of CMIP5 models performance on climate simulation in northeast China[J]. Climatic and Environmental Researh, 2016, 21(3): 357 – 366.]

[25] LIQ X, LIU X N, ZHANG H Z, et al. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(2): 260 – 268.

[26] 张锦明,郭丽萍,张小丹. 反距离加权插值算法中插值参数对 DEM 插值误差的影响[J]. 测绘科学技术学报,2012,29(1): 51 – 56. [ZHANG Jinming, GUO Liping, ZHANG Xiaodan. Effects of interpolation parameters in inverse distance weighted method on DEM accuracy[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2012, 29(1): 51 – 56.]

[27] 胡娅敏,丁一汇. 东亚地区区域气候模拟的研究进展[J]. 地球科学进展,2006,21(9):956 – 964. [HU Yamin, DING Yihui. Research progress of regional climate simulation in east Asia[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(9): 956 – 964.]

[28] 王林,陈文. 误差订正空间分解法在中国的应用[J]. 地球科学进展,2013,28(10):1144 – 1153. [WANG Lin, CHEN Wen. Application of bias correction and spatial disaggregation in removing model biases and downscaling over China[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(10): 1144 – 1153.]

[29] 栾贻花,俞永强,郑伟鹏. 全球高分辨率气候系统模式研究进展[J]. 地球科学进展,2016,31(3):258 – 268. [LUAN Yihua, YU Yongqiang, ZHENG Weipeng. Review of development and application of high resolution global climate system model[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(3): 258 – 268.]

Spatial difference characteristics on simulation capability of seasonal variation of air temperature simulated by three global climate models in China

LU Xiao-fei[1], REN Chuan-you[1], WANG Yan-hua[1], CUI Feng-qian[1],
LU Xiao-tong[1,2], GONG Zhao-jian[1,3]

(1 *Department of Atmospheric Sciences, Agronomy College, Shenyang Agricultural University, Shenyang* 110866, *Liaoning, China*;
2 *Liaoyang Meteorological Bureau, Liaoyang* 111000, *Liaoning, China*;
3 *Yingkou Economic-Technological Development Area Meteorological Bureau, Yingkou* 115007, *Liaoning, China*)

Abstract: The climate system model is an important tool for studying the mechanism of climate change and predicting future climate change. Due to the extreme complexity of the climate system, there may be some errors and limitations in simulating the climate. Therefore, it is necessary to evaluate the simulation capability of climate models. Nowadays, many researches have been done on the assessment of climate system modeling temperature capability and the prediction of future temperature changes. However, there is no report on the relationship between climate modeling capacity to simulate the seasonal variation of air temperature and some influencing factors. Therefore, this paper analyzes the spatial difference characteristics of simulation capability of air temperature in China, using BCC-CSM1.1(m), GFDL-CM3 and HADGEM2-ES global climate models from the Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5 (CMIP5), based on the daily mean temperature, maximum temperature and minimum temperature data obtained from 663 conventional meteorological stations in China during the time period from 1951 to 2004. The simulation capability of three models are verified by using the observational air temperature data, and its relationships are discussed with latitude, longitude, elevation, slope, aspect and terrain obscuration (slope, aspect and terrain obscuration are obtained from 500 m × 500 m digital elevation model). The results showed that the BCC-CSM1.1(m) and GFDL-CM3 model can reproduce the seasonal variation of air temperature in China. The mean absolute error and root mean square error of daily mean temperature and daily minimum temperature simulated by models are smaller in Northeast China, North China, South China and East China, the simulation capability is stronger than those in the other areas. However, in Western China, the simulation capability is relatively weak characterized by large mean absolute and root mean square errors. Compared with the daily mean and minimum temperature, the mean absolute error and root mean square error of daily maximum temperature simulated by models are larger in North China and Northeast China. The capability of reproducing the seasonal variation of air temperature in China from HADGEM2-ES model is the weakest if compared with the results from the BCC-CSM1.1(m) and the GFDL-CM3 models, and its mean absolute error and root mean square error were increased from south to north with larger errors in parts of Western China, Inner Mongolia and Northeast China, and smaller errors in the southern part of South China. For the three models, BCC-CSM1.1(m) model is the best in the simulation of the air temperature in China, followed by the GFDL-CM3 and HADGEM2-ES models. For each model, the simulation of the daily mean temperature is the best, followed by the daily minimum temperature, and the daily maximum temperature is the worst. The latitude, longitude, altitude and slope have different influences on the simulation effect of climate models among different models. The BCC-CSM1.1(m) and the GFDL-CM3 models have high simulation capability in low and high latitudes, low longitude, low slope and areas of an altitude less than 2 000 meters. The HADGEM2-ES model has high simulation capability in low latitude areas and 112°E nearby areas. The aspect and terrain obscuration have no significant impact on the simulation effect of climate models.

Key words: global climate models; air temperature; spatial difference